

# 고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물이온 확산모델

## A Chloride Ion Diffusion Model in Blast Furnace Slag Concrete

이 석 원 \*  
Yi, Seok Won

박 상 순 \*\*  
Park, Sang Soon

송 하 원 \*\*\*  
Song, Ha Won

변 근 주 \*\*\*\*  
Byun, Keun Joo

### ABSTRACT

It is known that chloride ion in concrete destroys the passive film of reinforcement inside concrete and accelerates corrosion which is the most influencing factor to durability of concrete structures.

In this thesis, a chloride ion diffusion model for blast furnace slag (BFS) concrete, which has better resistance to both damage due to salt and chloride ion penetration than ordinary portland cement concrete, is proposed by modifying existing model of normal concrete. Proposed model is verified by comparing diffusion analysis results with both results by indoor chloride penetration test for specimens and field test results for actual RC bridge pier.

Also, the optimum resistance condition to chloride penetration is obtained according to degrees of fineness and replacement ratios of BFS concrete. As a result, resistance to chloride ion penetration for BFS concrete is more affected by replacement ratio than degree of fineness.

### 1. 서 론

콘크리트 구조물의 내구성의 저하에 직·간접적인 영향을 미치는 요인은 무수히 많지만 그 중 해양 콘크리트 구조물의 증가 추세와 용빙제 사용량의 증가는 콘크리트 구조물의 내구성에 치명적인 영향을 미치고 있다. 해수 속에는 염화물이온을 포함한 여러 가지 유해이온이 녹아 있고 전세계적으로 주로 사용하고 있는 용빙제는 염화칼슘이나 소금으로 역시 염화물이온을 포함하고 있다.

여러 연구 결과에 의하면 염화물이온은 철의 부동태 피막을 파괴하여 부식을 촉진시키는 요인이며 철근의 부식이 구조물의 내구성에 가장 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 따라서 염해와 같은 주변 유해 환경에 대한 콘크리트의 내구성을 증가시키는 방법에 많은 관심이 집중되고 있다.

\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 공학석사

\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

\*\*\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

본 논문에서는 염해, 특히 염화물이온의 침투저항성이 우수한 고로슬래그 미분말을 혼화제로 사용한 콘크리트에서의 염화물이온 확산해석기법을 제안함으로써 보통포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트와의 내염해성을 비교하고 이를 통하여 실제 구조물에서의 염화물이온의 확산을 예측함으로써 별도의 시험없이 염화물이온의 침투깊이 및 깊이별 염화물이온농도를 구하여 철근의 부식 발생시기를 예측하고자 하는데 목적이 있다.

## 2. 고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물이온 확산 해석

### 2.1 고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물이온 확산 특성

고로슬래그 미분말은 잠재수경성 반응에 의해 콘크리트의 미세구조를 치밀하게 하는 물질로 알려져 있다. 고로슬래그 미분말의 잠재수경성은 비교적 장기재령에서 나타나는 것으로 보고되고 있으나, 본 논문의 시험결과 및 해석결과에 의하면 재령 28일에서도 보통포틀랜드시멘트에 비하여 non-stationary 상태, 즉 염화물이온의 침투와 고정화 반응이 동시에 일어나는 상태가 지연됨으로써 염화물이온의 침투를 크게 억제할 수 있음을 알 수 있다. 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트에서 non-stationary 상태가 지연되는 것은 시멘트 경화체의 조직이 치밀해짐에 따라 염화물이온의 침투, 확산 저항성이 큰 것을 의미하며, 그 결과 염화물이온의 확산계수도 크게 감소한다.

### 2.2 고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물이온 확산 해석

염화물이온 확산의 해석은 기존의 수분확산 프로그램인 COMW를 응용하여 해석을 실시하였다. 해석에 사용된 1차원 확산방정식과 확산계수식은 식 (1), 식 (2)와 같으며, 확산계수식은 Xi *et al.*(1999)이 제안한 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트의 확산계수식을 사용하였다.

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial C_f}{\partial C_i} \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$D_{Cl} = f_{Cl} D_m \left\{ 1 + \frac{g_i}{[(1-g_i)/3] + [1/(D_i/D_m - 1)]} \right\} \cdot \exp \left[ \frac{U}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] [1 - k_{ion}(C_f)^m] \quad (2)$$

식 (2)에서 고로슬래그 미분말을 혼화제로 사용하였을 경우의 영향을 가장 크게 고려해 줄 수 있는 인자는 시멘트 페이스트의 확산계수인  $D_m$ 이다. 이  $D_m$ 을 구하는 식은 식 (3)이고, 이 식에서 공극률  $V_p$ 를 식 (4)와 같이 고로슬래그 미분말의 치환률( $r$ )에 관한 함수로 나타낸다. 식 (4)는 수은 압입법을 통하여 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트와 고로슬래그 미분말 콘크리트의 공극률을 구한 시험결과에 의해 제안된 실험식이다.

$$D = \frac{2[1 - (V_p - V_p^c)]}{S^2} (V_p - V_p^c)^f \quad (3) \quad V_p = 0.18 \exp(0.0021r) \quad (4)$$

### 2.3 고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물이온 확산 해석 결과

고로슬래그 미분말의 영향을 고려한 염화물이온 확산을 해석한 결과 그림 1, 2와 같이 보통포틀랜드시멘트 콘크리트에 비해 고로슬래그 미분말을 혼화재로 사용한 경우가 염해에 대한 저항성이 더 우수한 것으로 나타났다. 또한, 고로슬래그 미분말의 분말도보다는 치환률에 따라 내염해성이 영향을 받는 것으로 나타났다. 치환률이 30%인 S38의 경우 보통포틀랜드시멘트 콘크리트(OPC)와 결과의 차이가 거의 없었으며, 치환률이 70%로 가장 높은 S78, S76, S74의 경우가 가장 내염해성이 우수하다는 결과를 얻었다.

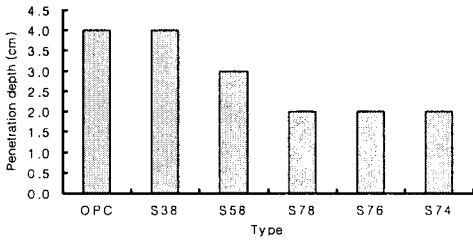


그림 1. Penetration depth

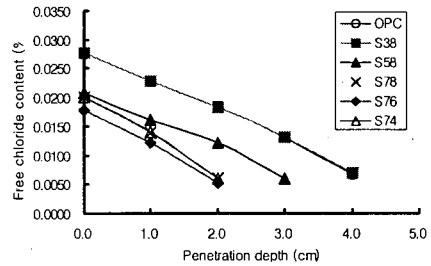


그림 2. Free chloride content

### 3. 고로슬래그 미분말 콘크리트의 염분침투시험

고로슬래그 미분말 콘크리트의 염분침투시험은 보통포틀랜드시멘트를 사용한 경우와 고로슬래그 미분말의 분말도(4000, 6000, 8000 cm<sup>2</sup>/g)에 대해 일정한 치환률(70%)로 치환한 경우에 대하여 비교분석하는 것으로 하였으며, 염화물이온의 침투저항성이 가장 우수한 것으로 알려진 분말도 8000(cm<sup>2</sup>/g)에 대해서는 치환률 30, 50(%)인 경우에 대해서도 시험하였다. 시편은 10×20 cm 원주형 공시체를 이용하여 케이스당 3개씩 제작하였으며, 양생은 2주간 수중양생시킨 다음, 시편 측면을 파라핀 코팅하여 재령 28일까지 기건양생한 후 종합내구성시험기를 이용하여 시험하였다. 시험조건은 4주간 35~40℃, RH 100%의 상태가 유지되는 가운데 3% NaCl용액이 분무되도록 하였다.

#### 3.1 염분침투시험 결과 및 분석

염화물량 측정에는 KS F 2515에 의해 깊이별 자유 염화물 농도를 측정함과 동시에 각 케이스에 대한 침투깊이를 동시에 측정하였다. 염화물량 측정시험을 한 결과 보통포틀랜드시멘트 콘크리트에 비해 고로슬래그 미분말을 혼화재로 사용한 경우가 내염해성이 더 우수한 것으로 나타났다. 또한, 고로슬래그 미분말의 분말도보다는 치환률에 따라 내염해성이 영향을 받는 것으로 나타났다. 치환률이 30%인 S38의 경우 보통포틀랜드시멘트 콘크리트(OPC)와 결과의 차이가 거의 없었으며, 치환률이 70%로 가장 높은 S78, S76, S74의 경우가 가장 내염해성이 우수하다는 결과를 얻었다.

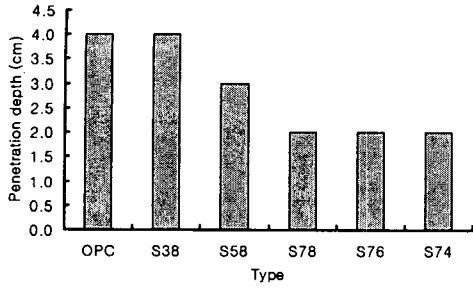


그림 3. Penetration depth

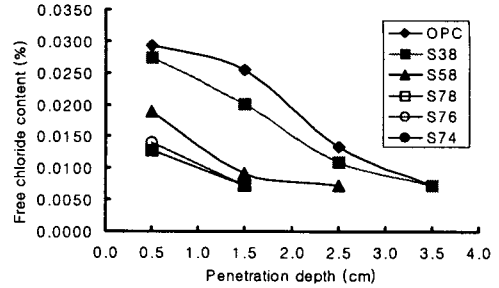


그림 4. Free chloride content

#### 4. 고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물이온 확산 해석 검증

##### 4.1 시험결과를 통한 염화물이온 확산 해석 검증

고로슬래그 미분말의 영향을 고려한 염화물이온 확산 해석 결과를 염분침투시험 결과와 비교하였다. 그림 5와 같이 각 케이스별 침투깊이가 해석결과와 시험결과가 일치하였으며, 그림 6 ~ 그림 11에서 보는 바와 같이 침투깊이별 자유 염화물 농도도 해석결과와 시험결과가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 따라서, 본 논문에서 제안한 고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물이온 확산 해석기법이 타당함을 알 수 있다.

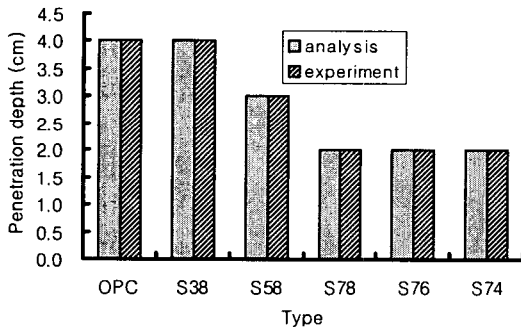


그림 5. Penetration depth

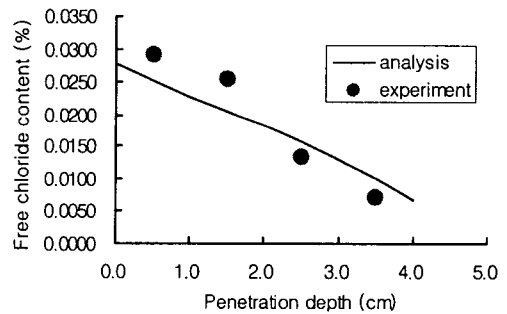


그림 6. Free chloride content (OPC)

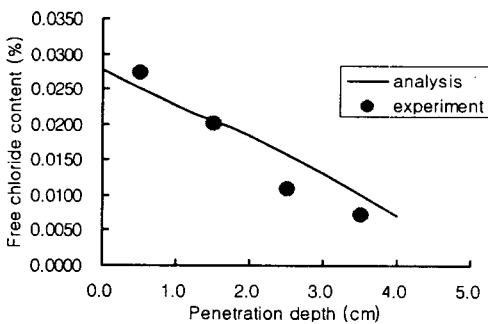


그림 7. Free chloride content (S38)

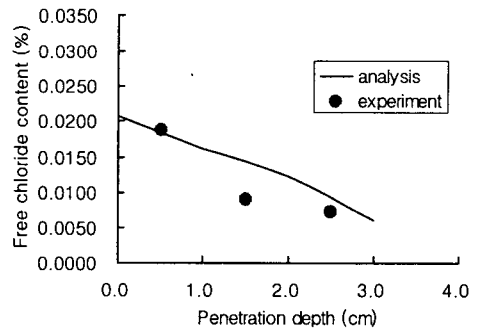


그림 8. Free chloride content (S58)

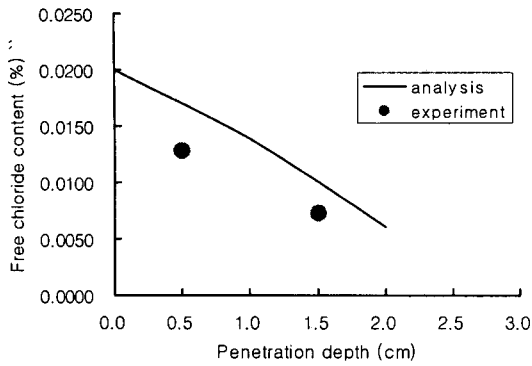


그림 9. Free chloride content (S78)

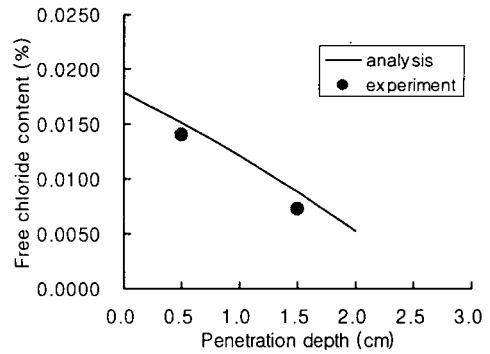


그림 10. Free chloride content (S76)

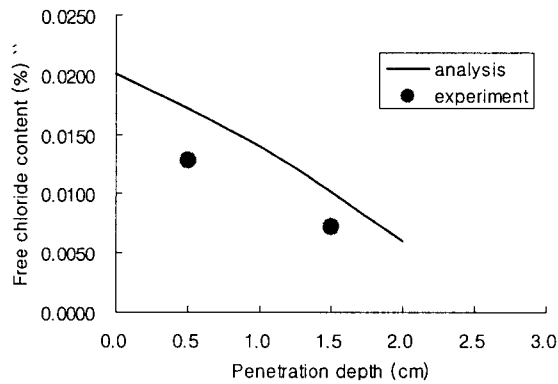


그림 11. Free chloride content (S74)

#### 4.2 염화물이온 확산의 실제 RC 구조물 적용 및 해석

제안된 염화물이온 확산 해석기법의 검증을 위하여 염해환경에 직접 노출되어 있는 실제 철근 콘크리트 구조물에 해석기법을 적용하여 해석하였다. 실제 철근 콘크리트 구조물에 대한 염분침투량시험 자료는 감사원에서 2000. 3월에 실시한 「염해환경에 노출된 철근 콘크리트 구조물의 염분침투량 조사·시험결과」를 근거로 하였다. 해석대상 구조물은 준공된 지 10년이 된 국내의 S 교량의 교각부위 로써 시험결과 철근위치인 10cm 깊이에 이미 철근부식임계염화물량(0.052%)보다 2배나 많은 0.1020%의 염화물량이 침투하여 앞으로 부식이 일어날 것이라고 보고되었다.

RC교량 교각부의 염화물량 측정시험은 해수중에 침지되어 있는 부분에서 코어를 채취하여 실시하였다. 코어는 피복두께인 10 cm 길이로 채취한 것으로써 10 cm 깊이인 부분에서의 총염화물량이 0.1020(%)로 나타났다. 해수중에 침지되어 있는 교량 교각부에서 피복두께가 10 cm이므로 해수침지부분을 코어링한 시편을 그림 12와 같이 모델링하여 해석을 실시하였다. 해석결과는 그림 13에 나타내었으며 재령 10년에서의 총염화물량이 시험결과와 일치하는 것으로 나타났다.

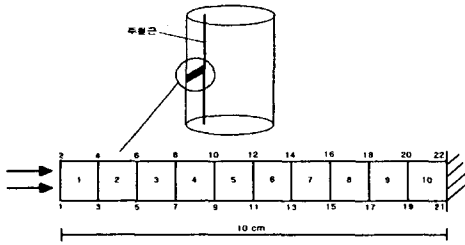


그림 12. One-dimensional chloride diffusion model

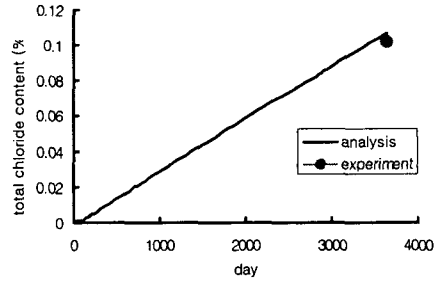


그림 13. Comparison of calculated results with experimental data

## 5. 결 론

본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 보통 콘크리트에 적용할 수 있는 Xi *et al.*(1999)이 제안한 염화물이온의 확산계수식을 변형하여 고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물이온 확산을 해석할 수 있는 식을 제안하였고, 염분침투시험을 통해서 제안된 해석기법을 검증하였으며, 향후에는 별도의 시험없이 제안된 해석기법으로 고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물이온 확산을 예측할 수 있도록 하였다.

(2) 고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물이온 확산모델 해석결과 보통포틀랜드시멘트 콘크리트에 비해서 내염해성이 우수한 것으로 나타났으며 분말도의 영향보다는 치환률의 영향을 더 받는 것으로 나타났다. 치환률이 70%인 경우가 가장 내염해성이 우수하였다. 또한, 해석기법의 타당성을 검증하기 위하여 실시한 염분침투시험결과도 해석결과와 일치하였다.

## 참 고 문 헌

- Otsuki, N., Hisada, M., Otani, T., and Maruyama, T. (1999), "Theoretical Evaluation of Diffusion Coefficient of Chloride Ion in Mortar from Mobility", *ACI Material Journal*, Vol. 96, No. 6, pp. 627-633.
- Xi, Y. and Bazant, Z. P. (1999), "Modeling Chloride Penetration in Saturated Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 58-65.
- 丸屋 剛, Somnuk T., 松岡康訓 (1992), "コンクリート中の鹽化物イオンの移動に關する解析的研究", *土木學會論文集*, Vol. 16, No. 442, pp. 81-90.
- 대한토목학회 (1995), 고로슬래그 시멘트 및 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 설계·시공지침(안)
- 한국도로공사 도로연구소 (1999), 콘크리트 구조물의 내구성 향상을 위한 시멘트 종류별 특성 연구